Covid-19 und die Rolle von Aerosolpartikeln

Stellungnahme des Arbeitsausschusses Feinstäube (AAF) von DECHEMA/ProcessNet, GDCh und KRdL[a,b]

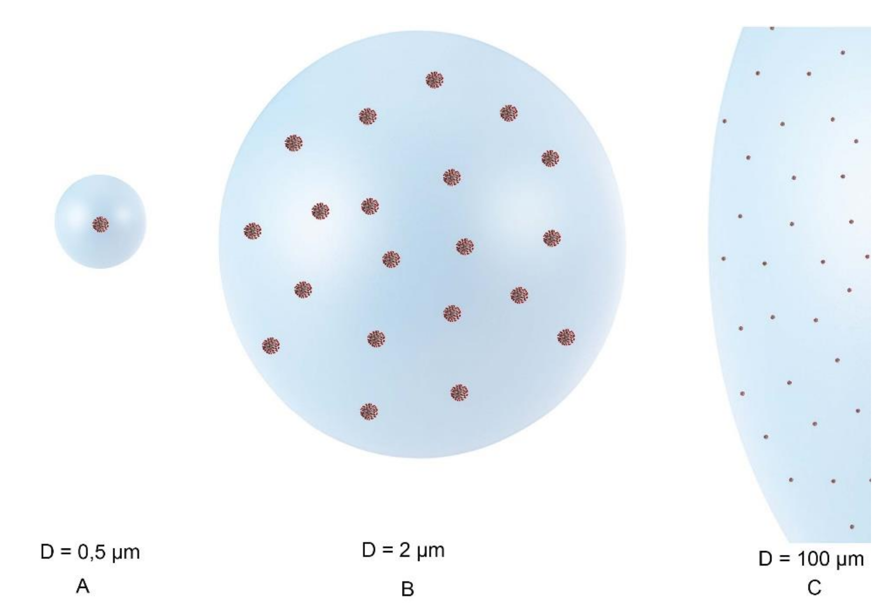
H. Herrmann[1)], P. Wiesen[2)], R. Zellner[3)] und C. Zetzsch[4)]

1: Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS), 04318 Leipzig; Vorsitzender des Arbeitsausschusses

2: Physikalische und Theoretische Chemie, Institut für Atmosphären- und Umweltforschung, Bergische Universität Wuppertal, 42119 Wuppertal

3: Fakultät für Chemie, Physikalische Chemie, Universität Duisburg-Essen, 45117 Essen

4: Max-Planck-Institut für Chemie, Abteilung Multiphasenchemie, 55128 Mainz und Forschungsstelle Atmosphärische Chemie, BayCEER, Universität Bayreuth, 95448 Bayreuth



Darstellung der Größenverhältnisse von SARS-CoV-2 Viren (0,1 µm) bei Aerosolpartikelemissionen aus Nase und Mund. Von links nach rechts: (A): Ruheatmung, (B): Sprechen, Singen und Schreien (Mund), (C): Noch größere Tröpfchen werden beim Niesen aus Nase und Mund ausgestoßen. Schwebende Viren sind in Speichel oder eingetrocknete Lungenflüssigkeit eingebettet, feuchtkaltes Klima und Dunkelheit verlängern ihre Aktivität. Partikel A können in ungelüfteten Räumen länger als einen Tag schweben, Partikel B mehrere Stunden. Die größten Partikel (C und zumeist noch größer) vom Niesen sinken in wenigen Sekunden zu Boden. Anders als Alltagsmasken schützen N95- und FFP2-Masken auch gegen Partikel A.

---

[a]: Wissenschaftliche Vereinigungen: DECHEMA (Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Frankfurt; ProcessNet: Plattform für Chemische Verfahrenstechnik von DECHEMA und VDI-GVC; VDI: Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf; GVC (Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen im VDI e.V. Düsseldorf); GDCh (Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V., Frankfurt); KRdL (VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss, Düsseldorf)

[b]: Diese Stellungnahme wird unterstützt und mitgetragen vom Leibniz-Institut für Troposphärenforschung (TROPOS) und der Gesellschaft für Aerosolforschung (GAeF)

[c]: Mit Beiträgen von E. Hösen-Seul, W. Koch, U. Krämer, G. Lammel, A. Mayer, S. Metzger, S. Nehr, U. Pöschl, E. Schmidt und K. Schwarz.

Im Arbeitsausschuss Feinstäube (AAF) beschäftigen sich Fachleute aus Chemie, Aerosolphysik und Ingenieurwissenschaften mit Fragen zur Herkunft, Ausbreitung, Zusammensetzung und Wirkung von Feinstäuben in der Umwelt. Viele Aspekte solcher Arbeiten sind auch in der gegenwärtigen Pandemie von Bedeutung.

Bisherige Erkenntnisse

Das SARS-CoV-2 Virus kann sich auf drei Wegen ausbreiten [1, 2, 3]: (i) über den Hautkontakt mit infektiösen Oberflächen, (ii) über größere Tröpfchen, die durch infizierte Personen beim Niesen, Husten oder auch beim Singen und lautem Sprechen ausgestoßen werden und die durch die Schleimhäute von Mund, Nase und Augen aufgenommen werden sowie (iii) über das Aus- und Einatmen von kleineren Schwebteilchen, den sog. Aerosolpartikeln. Im Gegensatz zu den mittleren und größeren Aerosolen B und C werden Aerosole A sogar im Schlaf ausgeatmet. Die Partikel A und B dringen am tiefsten in die infektanfälligen Bereiche der Lunge vor und können nur mit N95- oder FFP2-Masken zurückgehalten werden, da die Hygienemasken in diesem Größenbereich ihre maximale Durchlässigkeit haben. Sofern Partikel B bis zu den Lungenbläschen vordringen, werden sie dort vorzugsweise aufgenommen und stellen schon allein durch ihr ca. 100-faches Volumen ein besonderes Infektionsrisiko dar.

Vorsorgemaßnahmen gegen alle drei Infektionswege sind sorgfältiges Händewaschen, das Tragen von Atemmasken als Mund- und Nasenschutz sowie das Abstandhalten (AHA-Maßnahmen). Beim Arbeiten mit Infizierten in Krankenhäusern sind darüber hinaus Visiere bzw. Schutzbrillen zum Schutz der Augen notwendig. Während Händewaschen und Abstandhalten zu den einfachsten und einsichtigsten Vorsorgemaßnahmen gehören, besteht bei den Masken viel Unkenntnis über deren Wirkung und richtiges Tragen. Das generell Positive an Masken ist, dass sie in trockener Luft – wie in stark beheizten Räumen - den Verlust an Atemfeuchte verringern, dadurch die Schleimhäute feucht halten und die Eindringtiefe des Aerosols in die Atemwege verringern. Die sogenannten Alltags- oder Community-Masken schützen vor größeren Aerosolen oder Tröpfchen C. Diese Masken schützen aber wenig oder nicht vor den Schwebteilchen A und B. Dasselbe gilt für Trennscheiben oder Gesichtsvisiere, die nur einen Spritzschutz darstellen. Eine bessere Schutzwirkung vor dem Einatmen von Aerosolteilchen haben N95- und FFP2-Masken, allerdings auch nur dann, wenn die Maske gut schließend und die metallverstärkte Abdichtung am Nasenrücken optimal sitzt. Viele sinnvolle und aktuelle Informationen zu Masken und deren Eigenschaften finden sich unter [4]

Die Ausbreitung von SARS-CoV-2 Viren über die hier beschriebenen Aerosolpartikel A und B erklärt Vielfachinfektionen in stark besetzten Innenräumen wie in Schulen, Restaurants, Bussen, Nahverkehrszügen oder Flugzeugen sowie auf Kreuzfahrtschiffen und Fähren, bei Gottesdiensten [1] und Chorproben [5].

Der Ausbreitung über den Hautkontakt (i) wird mittlerweile ein weniger wichtiger Beitrag zum Infektionsgeschehen eingeräumt, was zu Beginn der Pandemie allerdings anders eingeschätzt wurde. Da sich die größeren Tröpfchen (ii) wie Bälle beim Wurf verhalten, ist ihre Aufenthaltsdauer in der Luft kurz und ihre räumliche Reichweite sehr begrenzt. Luftwiderstand und Schwerkraft sorgen dafür, dass ausgestoßene Tröpfchen mit beispielsweise 0,1 mm = 100 µm Durchmesser (C in der Abbildung) in ruhender Luft innerhalb von etwa 10 s in nächster Nähe durch Sedimentation zu Boden sinken. Dass solche Tröpfchen beim Schreien, Singen oder lautem Sprechen und insbesondere beim Niesen oder Husten gebildet werden, begründet die Abstandsregel 1,5 - 2 m. In Innenräumen wird das Absinken der größeren Teilchen durch den Auftrieb der warmen Atemluft leicht verzögert. Bei den kleinen Aerosolteilchen (A und B) ist der Auftrieb allerdings so stark, dass die Teilchen zunächst in Richtung Decke aufsteigen und sich von dort ausbreiten.

Die Aerosolpartikel A und B haben ein völlig anderes Ausbreitungsverhalten als die größeren Tröpfchen C oder noch größere. Aerosolpartikel (= Schwebteilchen), sinken nicht sofort herab, sondern schweben längere Zeit in der Luft [4] und werden durch Strömung und Verwirbelung

verbreitet und vermischt. Im Gegensatz zu den Tröpfchen entstehen feinste Partikel (A in der Abbildung) auch bereits beim normalen Atmen, da sie in den unteren Atemwegen im Bereich der Lungenbläschen gebildet werden. Nicht nur forciertes Atmen wie beim Sport oder Singen vergrößert die Emission extrem. Auch die individuelle Schwankungsbreite dieser Aerosolerzeugung ist groß. Unterschiede von Person zu Person um den Faktor 100 bei Ruheatmung oder normalem Sprechen kommen durchaus vor, unabhängig von Lungenvolumen, Atemtiefe, Alter oder Vorerkrankungen. Einige von uns sind daher sog. Superemitter [6], ohne dass dieses den Betreffenden überhaupt bewusst ist. Die Emissionskonzentrationen dieser Aerosolpartikel A aus dem Mund wachsen beim Sprechen und Singen linear mit der Lautstärke an. Auch diese sind individuell bis um den Faktor 10 verschieden – auch für diese Größenklasse gibt es Superemitter [7]. Infizierte Superemitter können somit „Superspreader“ sein, dadurch besonders intensiv zu Infektionen beitragen und möglicherweise viele Personen gleichzeitig anstecken. Durch Sprechen, Singen und Husten werden zusätzlich größere Partikel emittiert [8]. Beim Niesen werden die größten Partikel überhaupt emittiert [9]. Der größere Teil der Infektionen wird von einem kleinen Teil der Infizierten verursacht.

Exhalierte Tröpfchen, die aus wässrigen und/oder schleimbelegten Lösungen bestehen, haben - abhängig von Temperatur und Feuchte in der Luft - ein sehr dynamisches Verhalten. In trockener, warmer Luft wird der wässrige Teil verdunsten, die Tröpfchen schrumpfen und erhöhen damit die Aufenthaltszeit in der Luft. Es ist daher vorteilhaft, die relative Feuchte in Innenraumluft nicht zu stark absinken zu lassen, um die Aerosolpartikellebensdauern durch Abtrocknen nicht zu erhöhen [10]. Darüber hinaus ist eine nicht zu niedrige Luftfeuchte für die physiologische Funktion der menschlichen Schleimhäute vorteilhaft.

Wegen relativ rascher Verdünnung und der begrenzten Lebenszeit ist die Ansteckungsgefahr durch Viren in der Außenluft in den meisten Fällen gering. Wenn bei großen Familienfeiern oder auch den Anti-Corona-Demonstrationen Mund- und Nasenschutz sowie das Einhalten der Abstandsregel missachtet wird, kommen alle Ausbreitungswege gleichzeitig zusammen.

Deutlich am größten ist die Covid-19-Infektionsgefahr in Innenräumen ohne maschinelle Lüftung und in Räumen mit hohem Umluftanteil, wenn sich dort mehrere oder viele Personen aufhalten und nicht oder zu wenig gelüftet wird. Hier können sich virenbelastete Aerosole in den Räumen anreichern und das Infektionsrisiko erhöhen; dies gilt auch beim Tragen von Mund- und Nasenschutz. Wichtig sind intensives und wirksames Lüften (Fensterlüften) als eine einfache und kostengünstige Maßnahme oder maschinelle Lüftung mit möglichst hohem Außenluftanteil und wirksamer Filterung unvermeidlicher Umluftanteile. Der Infektionsschutz vor virenbelasteten Aerosolpartikeln durch Lüftungstechnik ist daher wichtig für die derzeitige Situation und die feuchtkalten Wintermonate, aber gleichzeitig in der technischen Realisierung vermutlich am anspruchsvollsten.

Die Basis für jedwede Filtertechnik von virenbelasteten Partikeln ist die genauere Kenntnis der physikalisch-chemischen und biologischen Eigenschaften solcher Partikel. Eine umfassende, unter Mitarbeit des Vorsitzenden des AAF entstandene Stoffsammlung zum Themenkomplex „FAQs zum Schutz vor Covid-19 Aerosolübertragung“ ist im Internet unter https://t.co/YhMaeLnEN3?amp=1 verfügbar [1]. Mittlerweile sind auch mathematische Modelle entwickelt worden, die das unterschiedliche Ausbreitungsverhalten von Tröpfchen und Aerosolpartikeln in Innenräumen in Gegenwart einer variablen Zahl von Personen in verschiedenen Situationen berücksichtigen und die Infektionsgefahr deutlich erkennen lassen [11].

Was ist zu tun und welche Maßnahmen sind erforderlich?

Die Mitglieder des Arbeitsausschusses Feinstäube (AAF) von DECHEMA/ProcessNet, GDCh und KRdL unterstützen alle Maßnahmen, die zur Eindämmung der Virusausbreitung sinnvoll sind. Insbesondere geht es primär und kurzfristig um die Unterbrechung von Infektionsketten zur Wiederherstellung der Nachverfolgbarkeit der Ausbreitung sowie die Vermeidung einer

Überlastung der Krankenversorgung. Wir unterstützen deshalb auch den mahnenden Aufruf der Präsidenten der führenden deutschen Forschungsgesellschaften und der Nationalen Akademie Leopoldina bezüglich der Dringlichkeit weiterer Schutzmaßnahmen [12], die neuerlich aufgrund der vielen Neuinfektionen erforderlich sind. Wir sehen deutlich den damit verbundenen kurz- und mittelfristigen personellen und technischen Aufwand, sind aber überzeugt, dass die angemessene Berücksichtigung der Virusausbreitung über den Aerosolpfad zu einer kurzfristigen und auch nachhaltigen Eindämmung des jetzigen Infektionsgeschehens führen und darüber hinaus auch für die Zukunft vorteilhaft sein kann. Wir unterstützen damit die aktuellen Empfehlungen des Robert-Koch-Instituts.

Neben den bereits verordneten Schutzmaßnahmen wie dem Tragen von Mund- und Nasenschutz und der Einhaltung der Abstandsregeln im Allgemeinen sowie dem Aufstellen von Plexiglasscheiben an stark frequentierten Stellen (Registrierkassen, Info- und Bankschalter u. ä.) sollten N95 oder FFP2-Schutzmasken verstärkt empfohlen und die aktiven Belüftungsmethoden in geschlossenen Räumen weiterentwickelt und umgesetzt werden. Beim regelmäßigen passiven Lüften, das seit einiger Zeit ebenfalls eine empfohlene Schutzmaßnahme in Schulen ist, wird eine Wirksamkeit des Lüftens nur dann erreicht, wenn eine Querlüftung (z.B. durch Öffnen der Tür oder als Stoßlüftung) durchgeführt werden kann. Eine zusätzliche Überwachung der CO_2-Konzentration zur Kontrolle des erreichten Luftaustauschs ist eine sinnvolle und notwendige Ergänzung.

Zu den aktiven Belüftungsmaßnahmen gibt es nach neueren Untersuchungen eine Reihe von Verbesserungsmöglichkeiten. In Bussen, Bahnen und Flugzeugen arbeiten herkömmliche Belüftungsanlagen bisher mit einer Frischluftzufuhr von oben. Auch in Ämtern, Bürogebäuden, Kaufhäusern u.a. sind solche Verfahren gebräuchlich, meist in Kombination mit Klima- oder Heizanlagen. Für eine Klimaregulierung macht eine solche Anordnung allein dadurch Sinn, dass die kältere Luft von selbst nach unten sinkt. Für einen Schutz vor infektiösen Partikeln ist die Belüftung von oben allerdings kontraproduktiv, da sie den mit der warmen aufsteigenden Atemluft ausgestoßenen Partikeln entgegen strömt und deren Ausbreitung durch Verwirbelung fördert. Dasselbe gilt für die in warmen Weltregionen gebräuchlichen Deckenventilatoren, die nur die Luft vermischen und mögliche Schadstoffe verteilen. Richtig dagegen wäre eine Luftabsaugung nach oben. Diese unterstützt die natürliche Bewegung der ausgeatmeten warmen Luft mit den Partikeln und entfernt diese nach draußen, ohne dass sie sich weiter im Raum ausbreiten. Eine Kontrolle der Luftqualität kann durch kontinuierliche Überwachung des CO_2-Gehalts mit einfachen Messgeräten erfolgen und weiter verbessert werden, da zugleich das CO_2 entfernt wird. Restanteile von CO_2 aus dem Atem ermöglichen dann eine genauere Beurteilung der Luftqualität bzw. -hygiene. Fragen zur Luftreinigung in Innenräumen im Zusammenhang mit Gesundheitsproblemen sind seit langem Gegenstand der ingenieurwissenschaftlichen Forschung [13, 14] Zur Entlüftung und Luftreinigung und zu Quellen, Eigenschaften und Verhalten von Aerosolen gibt es deutliche Fortschritte und neue Erkenntnisse aus Forschungs- und Industrielaboren wie dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz [15], der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt (DLR) [16], dem Fraunhofer-Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin in Hannover [17] sowie von Herrn A. Mayer (NanoCleanAir, Schweiz) [18]. Nach Meinung der genannten Forscher und Entwickler könnte man ca. 90% aller potentiell virenhaltiger Aerosole aus Klassenzimmern entfernen.

Im Einzelnen empfiehlt der AAF:

- Entlüftungen und Überkopfabsaugungen mit oder ohne Rückführung gefilterter Luft können und sollten in vielen Bereichen kurzfristig installiert werden.

- In den Bundesländern sollten Mittel bereitgestellt werden, um geeignete Entlüftungen, Absaugungen, Luftreinigungsanlagen und CO_2 Messgeräte in den Schulklassen zu installieren. Auf lokaler Ebene wäre es hilfreich, Verwaltungsregeln zu lockern und den Schulleitungen mehr Eigenverantwortung und -initiative zu übertragen und Mittel für die klima- und lüftungstechnische Beratung zur Verfügung zu stellen.

- Geeignete Entlüftungen, mobile Luftreiniger und CO_2-Messgeräte sollten auch in anderen stark besuchten Bereichen wie in Restaurants, Bars und Gaststätten eingesetzt und deren Beschaffung nach lüftungstechnischer Beratung gefördert werden. Auch für Kulturveranstaltungen könnten sich durch Überwachung des CO_2-Anteils und somit der Lufthygiene Möglichkeiten für eine Normalisierung des Betriebes ergeben.

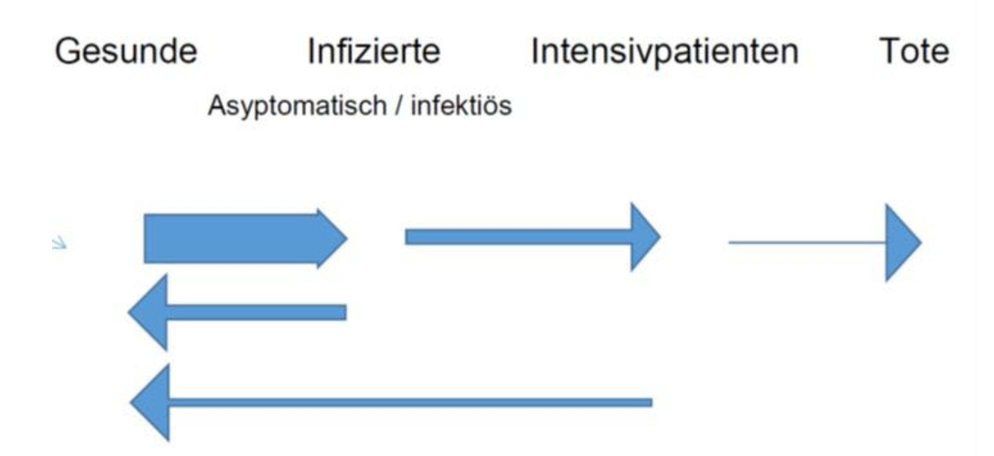
- Immer wieder wurde über Infektionen in Flugzeugen berichtet [19]. Die Luftzuführung in Passagierflugzeugen von oben nach unten widerspricht dem natürlichen Auftrieb von warmer, partikelbeladener Luft und fördert deren räumliche Ausbreitung, erhöht also das Infektionsrisiko. Eine Umkehr der Frischluftzufuhr ist sicherlich technisch möglich und sollte erwogen werden.

- Der AAF weist auch darauf hin, dass die Situation in Bussen, Nahverkehrszügen sowie S- und Stadtbahnen unbefriedigend ist. Es ist nicht auszuschließen, dass Fahrgäste in diesen Fahrzeugen aufgrund der hohen Belegungsdichte während der Stoßzeiten einer hohen Infektionsgefahr ausgesetzt sind, selbst wenn Masken – wie verordnet – getragen werden. Hier könnte ggf. eine optimierte Luftzuführung ebenfalls positive Effekte erzeugen.

- N 95 und FFP2- Masken sind nicht nur äußerst empfehlenswert, sondern sollten wegen ihrer besseren Filterwirkung für Partikel A in vielen Bereichen anstatt einfacher Hygienemasken vorgeschrieben und im Hinblick auf Atemwiderstand und Abdichtung verbessert werden.

- Genesenen Infizierten könnten Möglichkeiten zur medizinischen Untersuchung der individuellen Partikel- und Virenemission in Ruheatmung und beim Sprechen angeboten werden, damit eventuelle „Superemitter“ sich zukünftig bezüglich der Atemschutzmasken möglichst verantwortungsbewusst verhalten können.

- Beim Covid-19 Infektionsgeschehen stehen – wie bei jeder Infektion – Gesunde, Infizierte, Erkrankte und Tote in einer Dynamik die sich durch ein Flussdiagramm der folgenden Art darstellen lässt.



Die derzeitige Situation mit sehr hohen täglichen Neuinfektionen deutet darauf hin, dass das initiale Infektionsgeschehen trotz aller Maßnahmen in einem „Lock-down light“ nicht unter Kontrolle ist. Als Folge davon erhöhen sich sukzessive die Zahl der behandlungsbedürftigen Patienten auf den Intensivstationen und auch die der Toten. Um einen Kollaps der Krankenversorgung zu vermeiden, muss das Infektionsgeschehen soweit reduziert werden, dass die Kontrolle desselben über die Nachverfolgung durch die Gesundheitsämter wiederhergestellt wird. Nur dies wird das Infektionsgeschehen weiter reduzieren, siehe z.B. [20].

Die Mitglieder des Arbeitsausschusses Feinstäube (AAF) von DECHEMA/ ProcessNet, GDCh und KRdL unterstützen ausdrücklich die Berücksichtigung der im „Aerosol-FAQ“ [1] zusammengestellten Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen, betonen aber insbesondere die Notwendigkeit eines Umdenkens in der Belüftungstechnik. Sie fordern darüber hinaus die Verantwortlichen im Gesundheitswesen in Deutschland und Europa sowie in den entsprechenden supranationalen Einrichtungen (insbesondere die WHO) auf, soweit noch nicht ausdrücklich geschehen, die Rolle der Aerosolpartikel bei der Ausbreitung des SARS-CoV-2 Virus anzuerkennen und Maßnahmen auch zu deren Bekämpfung einzuleiten.

Der AAF unterstützt uneingeschränkt den politischen Willen in Deutschland, das Wirtschaftsleben sowie den Schulbetrieb in der Periode der Pandemie soweit als möglich aufrecht zu erhalten und den sensiblen, vorgeschädigten und/oder älteren Bevölkerungsgruppen speziellen Schutz zukommen zu lassen. Dies ist sich die Gesellschaft aus ökonomischen und ethischen Gründen selbst schuldig. Bald wird der Einsatz der gefundenen Impfstoffe das wichtigste Mittel sein. Kurzfristig bis dahin müssen und sollten wir, wie oben ausführlicher dargestellt, auf weitere Schutzmaßnahmen vertrauen. Diese Schutzmaßnahmen können dann auch mittel- und langfristig von großem Nutzen sein, z.B. für zukünftige Pandemiefälle oder auch die Zurückdrängung von Infektionen über den Luftpfad im Allgemeinen.

Literatur und Internet-Resourcen

1. “Aerosol-FAQ”, Internet resource, unter https://docs.google.com/document/d/e/2PACX-1vTgVkamic82Ux90zCWb5NFC6gYcDSWKYxKgh2y49uHQ5OJfGBAuQXs8igbmOaGqODI9wJ0UUnpo1dZu/pu und Zitate dort. Eine deutsche Version hierzu findet sich unter https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/themen/Corona/Dateien/Das_Corona-FAQ_VDI.pdf
2. Editorial, ‘COVID-19 transmission—up in the air’ The Lancet Respiratory Medicine, DOI: https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30514-2, https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600(20)30514-2/fulltext#.X57A7mB8mOk.twitter
3. Positionspapier der Gesellschaft für Aerosolforschung zum Verständnis des Beitrags des Aerosols zum Infektionsgeschehen, Autoren: C. Asbach, A. Held, A. Kiendler-Scharr, G. Scheuch, H.-J. Schmid, S. Schmitt, S. Schumacher, B. Wehner, E. Weingartner und B. Weinzierl, abrufbar über https://www.info.gaef.de/
4. (a) M.I. Tapia, https://mariaitapia.medium.com/which-fabric-masks-protect-us-best-against-coronavirus-d5cd4ab3e81f

   (b) Drewnick, F, Pikmann, J, Fachinger, F, Moormann ,L, Sprang, F., Borrmann, S (2020): Aerosol filtration efficiency of household materials for homemade face masks: Influence of material properties, particle size, particle electrical charge,face velocity, and leaks, Aerosol Science and Technology, https://DOI:10.1080/02786826.2020.1817846

   (c) Cheng, Y, Ma, N, Witt, C, Rapp, S, Wild, P, Andreae, M.O.,Pöschl, U, Su, H Distinct regimes of particle and virus abundance explain face mask efficacy for COVID-19, medRxiv, preprint server for health science, doi: https://doi.org/10.1101/2020.09.10.20190348 , Supplement: https://www.medrxiv.org/content/medrxiv/suppl/2020/09/11/2020.09.10.20190348.DC1/2020.09.10.20190348-1.pdf
5. Miller, SL, Nazaroff, WW, Jimenez, JL, et al. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. *Indoor Air*. 2020; 00: 1– 10. https://doi.org/10.1111/ina.12751
6. (a) Schwarz K, Biller H, Windt H, Koch W, Hohlfeld JM. Characterization of exhaled particles from the healthy human lung--a systematic analysis in relation to pulmonary function variables. J Aerosol Med Pulm Drug Deliv. 2010 Dec;23(6):371-9. doi: 10.1089/jamp.2009.0809. Epub 2010 May 25. PMID: 20500095.

(b) Schwarz K, Biller H, Windt H, Koch W, Hohlfeld JM. Characterization of exhaled particles from the human lungs in airway obstruction. J Aerosol Med Pulm Drug Deliv. 2015 Feb;28(1):52-8. doi: 10.1089/jamp.2013.1104. Epub 2014 Jun 10. PMID: 24914577.

7. Asadi, S., Wexler, A.S., Cappa, C.D., Barreda, S., Bouvier, N.M., Ristenpart, W.D. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep* **9,** 2348 (2019).

8. Morawska, L, Johnson, G, Ristovski, Z, Hargreaves, M. Mengersen, K. L., Corbett, S, Chao, C, Li, Y, Katoshevski, D (2009) Size distribution and sites of origin of droplets expelled during expiratory activities. Journal of Aerosol Science, 40(3). pp. 256-269. https://eprints.qut.edu.au/25835/1/c25835.pdf

9. Ahlawat, A., Wiedensohler, A. and Mishra, S.K. (2020). An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments. *Aerosol Air Qual. Res.* 20: 1856–1861. https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.06.0302

10. Han Z Y, Weng W G, Huang Q Y. 2013 Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. J R Soc Interface 10: 20130560. https://dx.doi.org/10.1098/rsif.2013.0560

11. (a) Rechner zur Bestimmung des Infektionsrisikos übe den Aerosolpfad: (a) Rechner von Prof. Jose Jiminez im Original: https://www.google.com/url?q=https://tinyurl.com/covid-estimator&sa=D&ust=1604681546612000&usg=AOvVaw3mrDWBQH5_XWEgpFxFjo4s

    (b) Eine einfache Implementation: https://www.nationalgeographic.com/science/2020/08/how-to-measure-risk-airborne-coronavirus-your-office-classroom-bus-ride-cvd/

    (d) Ein besserer Rechner: http://covid-exposure-modeler-data-devils.cloud.duke.edu/

    (e) Implementation des MPIC Mainz: https://www.mpic.de/4747361/risk-calculator und bei https://www.zeit.de/wissen/gesundheit/2020-11/coronavirus-aerosole-ansteckungsgefahr-infektion-hotspot-innenraeume

12. Gemeinsame Erklärung der Präsidentin der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Präsidenten von Fraunhofer-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft, Leibniz-Gemeinschaft, Max-Planck-Gesellschaft und Nationaler Akademie der Wissenschaften Leopoldina vom 27.10.2020 unter https://www.leibniz-gemeinschaft.de/ueber-uns/neues/forschungsnachrichten/forschungsnachrichten-single/newsdetails/coronavirus-es-ist-ernst.html

13. Richtlinienreihe VDI 6022 „Raumlufttechnik, Raumluftqualität“ https://www.vdi.de/richtlinien/unsere-richtlinien-highlights/vdi-6022

14. (a) Harvard T.H. Chan School of Public Health, https://forhealth.org/ und Resourcen dort.

    (b) REHVA (Dachverband der europäischen Verbände für Heizung, Lüftung und Klima) https://www.rehva.eu/ und Resourcen dort, insbesondere https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/rehva-covid-19-guidance

15. MPI für Chemie, Mainz, https://www.mpic.de/4770837/eine-lueftungsanlage-fuer-schulen-zum-selberbauen

16. Meldung über Experimente des DLR: https://www.tga-fachplaner.de/meldungen/raumlufttechnik-dlr-lueftungssysteme-sind-besser-als-offene-fenster

17. Katharina Schwarz, Fraunhofer ITEM, Vortrag beim AAF / CLK Workshop am 23.9.2020

18. Andreas Mayer, NanoCleanAir GmbH Schweiz, Vortrag beim AAF / CLK Workshop am 23.9.2020

19. J.A. Allen, https://twitter.com/j_g_allen/status/1319642012270927877?s=20, Bericht http://www.trb.org/Publications/Blurbs/169466.aspx , Publikation über Luftaustausch in Flugzeugen: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1420326X18793997

20. Contreras S., Dehning, J., Loidolt, M., Spitzner, F.P., Urrea-Quintero, J.H., Mohr, S.B., Wilczek, M. Zierenberg, J., Wibral, M. and Priesemann, V., The challenges of containing SARS-CoV-2 via test-trace-and-isolate, unter Review und Pressemitteilung des MPI für Dynamik und Selbstorganisation, Göttingen vom 18.9.2020 unter https://www.mpg.de/15409248/covid-19-corona-zweite-welle